

УДК 621.7.015

Л.П. Калафатова, д-р техн. наук, Покровск,  
С.Ю. Олейник, канд. техн. наук, Краматорск,  
Д.В. Поколенко, канд. техн. наук, Константиновка, Украина

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*У статті наведено математичну модель, яка описує відносні рухи елементів технологічної системи шліфування. Математичне моделювання виконано в програмі Matlab Simulink для технологічних умов етапу внутрішнього шліфування поверхні оболонок складної форми з крихких неметалевих матеріалів. Відносні переміщення елементів технологічної системи викликають похибки обробки профілю. Модель враховує вплив на похибку обробки зміни параметрів технологічних характеристик під час процесу шліфування.*

*Ключевые слова:* математичне моделювання, внутрішнє шліфування

*В статье приведена математическая модель, которая описывает относительные движения элементов технологической системы шлифования. Математическое моделирование выполнено в программе Matlab Simulink для технологических условий этапа внутреннего шлифования поверхности оболочек сложной формы из хрупких неметаллических материалов. Относительные перемещения элементов технологической системы вызывают погрешности обработки профиля. Модель учитывает влияние на погрешность обработки изменение параметров технологических характеристик во время процесса шлифования.*

*Ключові слова:* математичне моделювання, внутрішнє шліфування

*The article presents a mathematical model that describes the relative movements of elements of a technological grinding system. The mathematical modeling is performed in the program Matlab Simulink for technological conditions of the stage of internal grinding of the surface of shells of complex shape from brittle nonmetallic materials. Relative movements of the elements of the technological system cause errors in the machining of the profile. The model considers the influence on the error of machining the change in the parameters of technological characteristics during the grinding process.*

*Keywords:* mathematical model, internal grinding

### **Введение**

Повышение конкурентоспособности продукции авиакосмической и ракетной промышленности невозможно без уменьшения трудоемкости её изготовления при обеспечении заданного качества деталей, которое возможно за счет повышения гибкости в организации производственного процесса, обновления и модернизации оборудования, применения современных технологий получения заготовок, нового инструмента, прогрессивных схем и режимов резания.

Сложнопрофильные тонкостенные оболочки из хрупких неметаллических материалов типа технических ситаллов и керамики длиной

от 0,5 до 2 м и диаметром от 200 мм до 500 мм, с толщиной стенки изделия от 4 до 6 мм, например, обтекатели ракет различных классов [1, 2], относятся к элементам, обладающим высокой трудоемкостью изготовления. Это связано также с низким уровнем автоматизации технологических процессов (ТП) обработки изделий. К таким изделиям предъявляются высокие требования по механической прочности, термостойкости, радиотехническим характеристикам, которые обеспечиваются геометрической точностью профиля и стенки детали и характеристиками поверхностного слоя (структурой нарушенного обработкой дефектного слоя, поверхностными напряжениями, волнистостью и шероховатостью обработанной поверхности).

ТП изготовления обтекателей из ситалла включает следующие этапы производства: подготовка сырья; стекловарение; формование заготовок; их термическая обработка; механическая обработка; упрочнение; радиотехническая настройка и химическая доработка. Процесс механической обработки многостадийен, что связано не только с особенностями алмазного шлифования хрупкого материала, но и с низкой точностью заготовки. Заготовку изделия получают центробежным литьем, во время которого образуются значительные отклонения от размеров по толщине стенки изделия, а также имеет место неравномерный по длине изделия характер этих отклонений. Неравномерность по толщине стенки заготовки зависит от формовочных свойств материала, которые определяются вязкостью и температурой стекломассы, нестабильностью технологических параметров процесса формовки, а также недостаточной однородностью стекломассы, что приводит к отклонению от соосности внутреннего и наружного контуров заготовки, которое может достигать 10 мм. Эллипсоидная форма внутреннего отверстия заготовки во время механической обработки приводит к неравномерности припуска, что вызывает колебания сил резания, переменный характер отжатий инструмента при его перемещении вдоль контура, вибрации в технологической системе. Недостатком шлифования заготовок с неравномерным припуском является необходимость в постоянной корректировке параметров режима обработки, прежде всего глубины резания, что приводит к увеличению количества проходов и времени обработки заготовки, повышенному износу алмазного инструмента, высокому уровню дефектности в поверхностном слое, особенно в зонах врезания инструмента [3]. Дефекты механической обработки, которые появляются на этапе формирования внутреннего контура из-за указанных выше недостатков, наиболее часто приводят к разрушению готового изделия во время стендовых испытаний [4].

В условиях жесткой конкуренции перспективные предприятия переоснащаются новым высокотехнологичным оборудованием, которое дает возможность внедрять более эффективные схемы резания и применять адаптивное управление ходом ТП. Последнее невозможно без установления

качественных и количественных связей между действующими технологическими факторами и погрешностями обработки. Поэтому актуальны исследования, связанные с установлением аналитической связи между явлениями, возникающими во время механической обработки сложно профильных изделий, и погрешностями формы и геометрии изделий.

В работах [3 - 5] уделялось внимание изучению факторов, влияющих на погрешность точности профиля и качество поверхности тонкостенных оболочек из ситалла. Однако, как правило, ограничивались выявлением закономерностей возникновения погрешностей на отдельных этапах изготовления изделия без учета взаимосвязи их между собой. В исследовании, представленном в работе [6], разработана рациональная схема обработки для этапа шлифования внутреннего профиля изделия на основании анализа напряженного состояния обрабатываемого материала при различных вариантах приложения нагрузки, что позволило снизить негативное влияние радиальной составляющей силы резания на качество поверхностного слоя.

В работе [7] приведены результаты расчетов погрешности профиля изделия в зависимости от величины систематических погрешностей в технологической системе на операциях внутреннего и внешнего алмазного шлифования. Установлено, что основными определяющими факторами при этом являются переменная жесткость заготовки по длине, а также ее изменение при закреплении заготовки в приспособлении. В работах [8, 9] исследованы факторы, влияющие на появление значительного уровня вибраций в технологической системе, а, следовательно, и качество поверхностного слоя, что позволило разработать способы снижения уровня вибраций [10, 11].

Разработка ТП изготовления рассматриваемых изделий в условиях автоматизированного производства ставит задачу исследования комплексного воздействия технологических факторов на погрешности, возникающие при механической обработки.

**Целью работы** является анализ факторов начального и текущего (в процессе обработки) состояния технологической системы алмазного внутреннего шлифования тонкостенных оболочек, влияющих на появление погрешности профиля изделия на этапе их чернового шлифования.

### **Основное содержание работы**

Ранее в работах [12, 13] рассматривалась обобщенная математическая модель образования погрешности профиля тонкостенной крупногабаритной оболочки вращения во время внутреннего и наружного шлифования для условий реального производства подобных деталей. Математическая модель формирования профиля изделия включает уравнения относительного движения технологических баз обрабатываемой заготовки и точки контакта рабочей поверхности круга с заготовкой.

Первым этапом механической обработки изделия является черновое шлифование внутреннего контура. Трудоемкость этого этапа напрямую связана с качеством исходной заготовки. Как было рассмотрено выше, основными погрешностями заготовки, которые влияют на точность профиля на данном этапе обработки является эллипсность внутренней поверхности и неравномерный припуск по длине изделия. Во время обработки (рис. 1) заготовка устанавливается в консольном приспособлении.

Из-за сложности профиля изделия применяются шлифовальные круги различных типоразмеров. В данном случае рассмотрим шлифование цилиндрического участка профиля (поз. 6, рис. 1) от торца вглубь изделия алмазным кругом диаметром 100 мм. Формирование параболической и конической частей, а также купола изделия на данном этапе исследований не рассматривается.

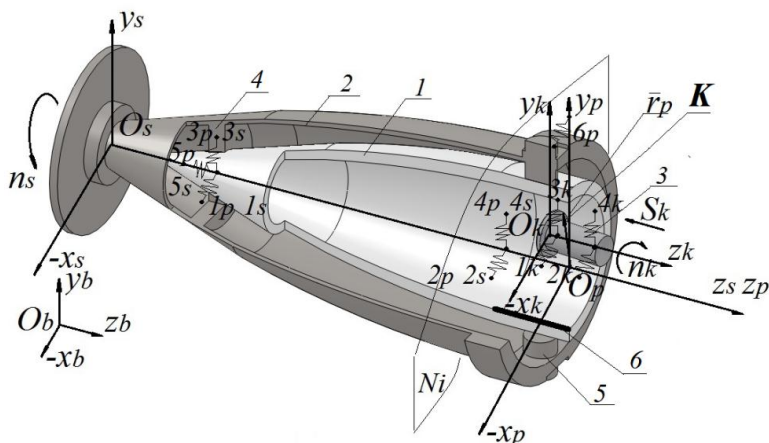


Рисунок 1 – Схема шлифования внутренней поверхности оболочки с указанием расположения систем координат элементов технологической системы

На схеме (см. рис. 1) представлены: 1 - обрабатываемое изделие, которое обозначено в системе координат  $\sum_p (O_p x_p y_p z_p)$ ; 2 - приспособление в системе координат  $\sum_s (O_s x_s y_s z_s)$ , где 4 – установочная опора, 5 – регулировочная опора; 3 – инструмент с системой координат  $\sum_k$ , а также неподвижная система координат станка  $\sum_b$ . Чтобы выяснить влияние какого-либо фактора на точность обработки, на схеме (см. рис. 1) обозначены опорные точки 1s, 2s, 3s, 4s, 5s, 1p, 2p, 3p, 4p, 5p, 6p, 1k, 2k, 3k, 4k для каждой

подсистемы координат, которые представляют собой упругие связи между подсистемами и позволяют «связать» точки на поверхности детали указанных подсистем с осями систем координат.

Аналитическое выражение относительных перемещений системы координат описанных элементов технологической системы, которые заложены в математическую модель, позволяет вычислить непосредственное влияние технологических факторов на изменение радиуса-вектора  $\bar{r}_p$  от заданого [12]:

$$\bar{r}_p = M_p M_s' M_s M_k' M_k \bar{r}_k + M_p M_s' M_s (\bar{r}_{o_k} + \bar{S}_k - \bar{r}_{o_s}) - M_p \bar{r}_{so_p} \quad (1)$$

где  $M_p$  – матрица поворотов системы координат заготовки вокруг осей  $O_p X_p, O_p Y_p, O_p Z_p$ ;  $M_s'$  – матрица поворота, учитывающая заданное схемой относительного движения обрабатываемой заготовки и круга вращение системы координат шпиндель-приспособление, которая описывает изменение её угла поворота вокруг оси  $Z - \theta_s$  при заданной частоте вращения  $n_s$ ;  $M_s$  – матрица поворота системы координат шпиндель-приспособление вокруг осей  $O_s X_s, O_s Y_s, O_s Z_s$ ;  $M_k'$  – матрица поворота, учитывающая заданные схемой вращение координат шлифовального круга в неподвижной системе координат станка, т.е. изменение её угла поворота вокруг оси  $Z - \theta_k$  при заданной частоте вращения  $n_k$ ;  $M_k$  – матрица поворота системы координат шлифовального круга вокруг осей  $O_k X_k, O_k Y_k, O_k Z_k$ ;  $\bar{r}_k$  – радиус-вектор, определяющий положение точки  $K$  (точки в зоне контакта рабочей поверхности круга с заготовкой) в системе координат шлифовального круга;  $\bar{r}_{o_k}$  – радиус-вектор, определяющий положение начала системы координат инструмента  $O_k$  в неподвижной системе координат станка;  $\bar{r}_{o_s}$  – радиус-вектор, определяющий положение начала системы координат шпинделя-приспособления  $O_s$  в неподвижной системе станка;  $\bar{S}_k$  – вектор перемещения системы координат шлифовального круга в неподвижной системе координат станка со скоростью подачи, которая определяется режимом обработки;  $\bar{r}_{so_p}$  – радиус-вектор, определяющий положение начала системы координат заготовки  $O_p$  в системе координат шпиндель - приспособление.

Расчеты с использованием математической модели (1) реализованы в системе визуального математического моделирования Matlab Simulink.

Применение системы имитационного моделирования позволяет исследовать формирование профиля поверхности во время шлифования с учетом переменного характера исходных данных, которые описываются как аналитическими, так и экспериментальными зависимостями.

Результатом решения является изменения координаты вектора  $\bar{r}_p$  с течением времени, что в совокупности описывает контур формируемой поверхности после обработки инструментом. Сравнение полученных координат с заданными покажет погрешность профиля детали в каждой её точке  $K_i$ :

$$\Delta \bar{r}_p = \bar{r}_{p_i} - \bar{r}_{p_{i0}}, \quad (2)$$

где  $\bar{r}_{p_{i0}}$  – заданное значение проекции радиус-вектора  $\bar{r}_p$  на плоскость  $N_i$  в зоне контакта к соответствующей точке контакта круга и заготовки  $K$ ;  $\bar{r}_{p_i}$  – получаемое после обработки значение проекции вектора  $\bar{r}_p$  на плоскость  $N_i$  в зоне контакта к соответствующей точке контакта круга и заготовки  $K$ .

Погрешность обработки профиля рассматриваемой оболочки связана с погрешностью установки, погрешностями статической и динамической настроек технологической системы. Начальные значения параметров уравнения движения характеризуют относительное положение технологических баз заготовки и режущей поверхности шлифовального круга и определяются постоянными во всем времени моделирования показателями, которые являются коэффициентами элементов математической модели (1):

$$M_p, M_s, M_k, \bar{r}_{o_k}, \bar{r}_{o_s}, \bar{r}_{so_p}.$$

Для условий установки заготовки при обработке внутреннего контура погрешность установки в основном связана с погрешностью базирования, а погрешности закрепления и приспособления по сравнению с ней незначительны [3, 7]. Погрешность базирования при этом присутствует как в осевом, так и в радиальном направлениях. Для схемы (см. рис. 1) погрешность базирования в осевом направлении характеризует отклонение показателя  $\Delta z_{so_p}$  (изменение координаты вектора  $\bar{r}_{so_p}$  в направлении оси  $Z$ ) и соответствует величине, которая зависит от угла опорного конуса в приспособлении и допуска на размер детали в месте базирования по конусу, что приводит к появлению разнотолщинности изделия по профилю вдоль его длины на коническом и параболическом участках заготовки. В радиальном направлении погрешность базирования при внутренней обработке

определяется точностью выверки оси заготовки и характеризуется показателями  $\Delta x_{so_p}$  и  $\Delta y_{so_p}$ , то есть отклонениями координат опорных точек системы детали  $\sum_p$  в системе приспособления  $\sum_s$  на постоянную величину в известном диапазоне, который зависит от состояния технологической системы.

Приспособление с заготовкой консольно закрепляется в патроне станка (см. рис. 1) и во время шлифования под собственным весом прогибается, что вызывает погрешность  $\Delta x_{bo_s} = k z_s$  при движении круга в направлении подачи, уменьшающуюся в направлении от торца заготовки к носку.

Настройка станка на размер заключается в установке шпинделя шлифовального круга в положение, при котором обеспечиваются получение выдерживаемого размера и взаимного расположения поверхностей и определяется параметром  $\Delta x_{bo_k}$  – отклонениями координат опорных точек

системы инструмента  $\sum_k$  в системе станка  $\sum_b$  на постоянную величину с полем рассеивания положения шлифовального круга, которое зависит от параметров точности технологической системы. Необходимо учесть на данном этапе погрешность профилирования, которая связана с износом круга и характеризуется показателем  $\Delta x_k$ , как отклонение на постоянную величину в системе инструмента  $\sum_k$ .

Текущие значения параметров уравнения относительного движения появляются в процессе съема припуска с заготовки во время обработки и характеризуются относительным движением технологических баз детали и режущей поверхности инструмента. При этом они вызывают отклонение как начальных, так и текущих значений параметров относительного движения, провоцируя погрешности размеров, относительных поворотов и геометрической формы.

В соответствии с наиболее рациональным в существующих производственных условиях технологическим процессом получение необходимого профиля изделия с заданной толщиной стенки начинается с этапа внутреннего шлифования. Как уже было упомянуто, заготовка изделия имеет переменный припуск  $h_z$  в радиальном и в продольном направлениях [3], что вызывает изменения снимаемого припуска с поверхности, а, следовательно, и сил резания, которые вызывают отжатия подсистем «приспособление-заготовка»  $\sum_s(\sum_p)$  и подсистемы шлифовального круга  $\sum_k$  и неуравновешенность заготовки во время обработки. Присутствие во время обработки заготовки неуравновешенных масс вызывает при её вращении

появление силы инерции, под действием которой нарушается заданное относительное положение систем координат заготовки, приспособления и шлифовального круга через их упругие перемещения в опорах. Таким образом, во время обработки на заготовку действуют силы резания, инерции и тяжести.

Для того, чтобы учесть влияние неуравновешенной массы и изменения жесткости на смещение и поворот заготовки во время обработки, в данном случае представим смещение подсистемы «приспособление-заготовка»  $\sum_s (\sum_p)$  относительно неподвижной подсистемы станка  $\sum_b$  путем внесения в расчетную модель переменных величин  $y_{so_p}$  и  $x_{so_p}$ :

$$\begin{aligned}\Delta x_{so_p} &= \lambda_{1p} + z_{p1p} \cdot tg \Delta \psi_p \\ \Delta y_{so_p} &= \lambda_{3p} + z_{p1p} \cdot tg \Delta \varphi_p\end{aligned}\quad (3)$$

где  $\lambda_{1p}$  и  $\lambda_{3p}$  - упругие перемещения опорных точек 1 и 3 соответственно в направлении  $x$  и  $y$ . Представляют собой функцию  $\lambda_{ip} = f(P_i, j_i)$ , составляющие которой  $P_i$  - сумма сил, действующих на  $i$ -ую опорную точку, к которым относятся силы, возникающие в результате процесса шлифования, сила тяжести, силы инерции как результат неуравновешенности подсистемы «приспособление-заготовка»,  $j_i$  - жесткость  $i$ -ой опоры. Так как для условий механической обработки характерен переменный характер величины  $P_i$ , то и погрешность во время обработки в плоскости  $N_i$  будет иметь переменный характер;  $z_{p1p}$  - координата опорной точки 1 $p$  по оси  $z$  с учетом погрешности установки и настройки системы;  $\Delta \psi_p$ ,  $\Delta \varphi_p$  - характеризуют угловую погрешность, определяются по геометрическим зависимостям:

$$\begin{aligned}\Delta \varphi_p &= \arctg \left( \frac{\lambda_{2p} - \lambda_{1p}}{z_{p2p} - z_{p1p}} \right) \\ \Delta \psi_p &= \arctg \left( \frac{\lambda_{4p} - \lambda_{3p}}{z_{p4p} - z_{p3p}} \right)\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\lambda_{2p}$  и  $\lambda_{4p}$  - упругие перемещения опорных точек 2 и 4 соответственно в направлении  $x$  и  $y$ ;  $z_{p2p}$ ,  $z_{p3p}$ ,  $z_{p4p}$  - координаты опорных точек 2 $p$ , 3 $p$ , 4 $p$  по оси  $z$  (см. рис. 2).



На рис. 2 в точке  $K$  (зона контакта шлифовального круга и обрабатываемой заготовки) действует сила резания  $\bar{P}$ , представленная в виде составляющих:  $P_n$ ,  $P_\tau$ ,  $P_o$  (нормальной, тангенциальной и осевой, соответственно).

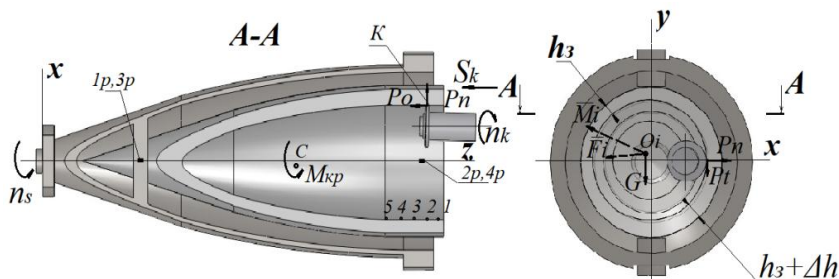


Рисунок 2 – Схема сил, действующих во время внутреннего шлифования на элементы технологической системы

На рис. 3 показаны следующие параметры: сила инерции  $\bar{F}_i$ ; момент инерции  $\bar{M}_i$  – точка приложения  $O_i$ ; крутящий момент  $M_{кр}$  вокруг оси  $O_s Z_s$  и сила тяжести  $\bar{G}$ , приложенная в центре тяжести подсистемы «приспособление-заготовка».

Подставляя исходные данные (на примере обработки, реализуемой в реальных производственных условиях [1-3, 7]) в математическую модель получаем погрешность профиля заготовки в позициях 1, 2, 3, 4, 5 (в плоскости  $XOZ$ ) на цилиндрическом участке. Для сравнения приведем результаты (рис. 3), полученные с учетом наличия в системе неуравновешенной массы, которая появляется из-за низкой точности заготовки. Расчет показал, что заготовка, имеющая переменный припуск, под действием указанных сил и моментов во время обработки, нарушает заданные относительные положения подсистем рассматриваемой технологической системы. Абсолютная погрешность обработки на первом проходе увеличивается в 4 раза и имеет неравномерный характер изменения вдоль обрабатываемой поверхности в направлении подачи, то есть вызывает волнистость поверхности. Погрешности обработки будут копироваться на последующие переходы, тем самым снижая их качество и увеличивая трудоемкость получения годной детали.

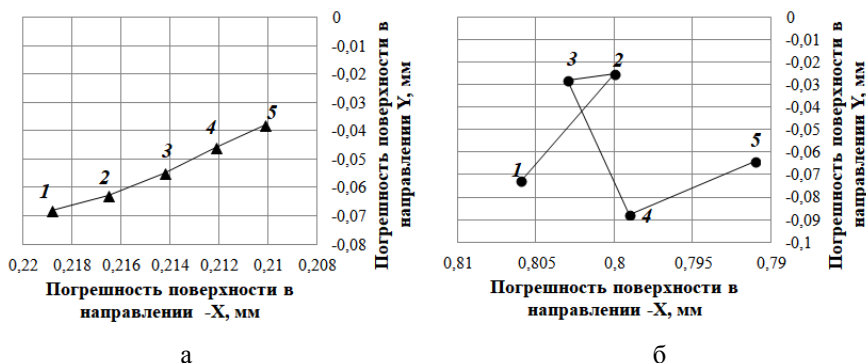


Рисунок 3 – Влияние качества заготовки на погрешность обработки внутренней поверхности заготовки для условий:  
 а - постоянного по диаметру и длине припуска;  
 б - переменного по диаметру и длине припуска

## Выводы

1. Представленная математическая модель позволяет учитывать влияние на точность обработки переменных нагрузок, возникающих во время обработки контура изделия. Это позволяет выявлять технологические факторы, оказывающие отрицательное влияние на результат обработки, а также моделировать условия, уменьшающие их негативные воздействия.

2. Результаты расчетов показали, что основным технологическим фактором, оказывающим влияние на величину погрешности изделия при шлифовании его внутреннего профиля, является качество заготовки, которое выражается в значительных отклонениях стенки заготовки (до 10 мм) по диаметру и неравномерности по длине изделия, эллипсности и несоосности наружного и внутреннего профилей заготовки. Повышение качества заготовки позволит в четыре раза снизить погрешность обработки на черновых проходах.

**Список использованных источников:** 1. Калафатова Л.П. Повышение эффективности шлифования твердых сплавов и конструкционной керамики: монография / Л.П. Калафатова, П.Г. Матюха, Д.В. Поколенко, С.Ю. Олейник, С.А. Поезд. – Покровск: ГВУЗ «ДонНТУ», 2017. – 182 с. 2. Гусев В. В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова. – Донецк: ГВЗУ «ДонНТУ», 2012. – 252с. 3. Поколенко Д.В. Підвищення ефективності обробки антенних об'єктивників із ситалів за рахунок удосконалення технології алмазного шліфування: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.02.08 / ДонНТУ. – Донецьк, 2014. – 20 с. 4. Калафатова Л. П. Технологічні основи підвищення ефективності обробки та забезпечення якості виробів із технічних стекл і ситалів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / НТУ «ХП». – Харків, 2001. – 26 с. 5. Олійник С. Ю. Забезпечення якості обробки тонкостінних ситалових оболонок шляхом покращення динамічних характеристик технологічної системи шліфування: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / ДонНТУ. – Красноармійськ, 2014. – 20 с. 6. Калафатова Л.П. Проектирование рациональной схемы шлифования на основе результатов

компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния материала в зоне резания / Л.П. Калафатова // Резание и инструмент в технологических системах. – Харків: НТУ «ХПІ», 2000. – № 57. – С. 96-99. **7. Калафатова Л. П.** Исследование точности формообразования изделий из ситаллов при шлифовании / Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко, Л.Н. Феник // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – № 4 (124). – С. 96-108. **8. Гусев В.В.** Обоснование расчетной схемы для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситалла / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 6. – С. 14-23. **9. Гусев В.В.** Исследование динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П.Калафатова, С.Ю. Олейник // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вип. 128. – С. 60-67. **10. Гусев В.В.** Теоретическое исследование влияния режимов обработки на уровень вибраций при алмазном шлифовании тонкостенных оболочек из хрупких неметаллических материалов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вип. № 139/2013. – С. 57-62. **11. Гусев В.В.** Исследование влияния конструкции оправки на вибрации в зоне контакта алмазного круга и изделия при шлифовании крупногабаритных тонкостенных оболочек вращения из хрупких неметаллических материалов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. - Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 122-133. **12. Калафатова Л.П.** Математическая модель для определения закономерностей формирования погрешности обработки при шлифовании оболочек сложного профиля из ситалла / Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник, Д.В. Поколенко // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – Херсон, 2016. – №2 (13). – С. 89-99. **13. Олійник С.** Аналітична модель механізму утворення сумарної похибки профілю виробів типу оболонок з крихких неметалевих матеріалів під час алмазного шліфування / С.Ю. Олійник, Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Технічні науки та технології: науковий журнал. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – № 1(7). – С. 33-41.

**Bibliography (transliterated):**1. Kalafatova L.P. Povyshenie jeffektivnosti shlifovaniya tverdyh splavov i konstruktsionnoy keramiki: monografiya / L.P. Kalafatova, P.G. Matjuha, D.V. Pokolenko, S.Ju. Olejnik, S.A. Poezd. – Pokrovsk: GVUZ «DonNTU», 2017. – 182 s. **2. Gusev V. V.** Tehnologicheskoe obespechenie kachestva obrabotki izdelij iz tehnichekoj keramiki: monografiya / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova. – Doneck: GVZU «DonNTU», 2012. – 252s. **3. Pokolenko D. V.** Pidvishhennja efektyvnosti obrobki antennih obitchnikiv iz sitaliv za rahunok udoskonalennja tehnologії almaznogo shlifuvannja: avtoref. dis. ... k-ta tehn. nauk: 05.02.08 / DonNTU. – Donec'k, 2014. – 20 s. **4. Kalafatova L.P.** Tehnologichni osnovi pidvishhennja efektyvnosti obrobki ta zabezpechennja yakosti virobiv iz tehnicnih stekol i sitaliv: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.02.08 / NTU «HPІ». – Har'kov, 2001. – 26 s. **5. Olijnik S. Ju.** Zabezpechennja yakosti obrobki tonkostinnih sitalovih obolonok shljahom pokrashhennja dinamichnih charakteristik tehnologichnoi sistemi shlifuvannja: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.08 / DonNTU. – Krasnoarmijs'k, 2014. – 20 s. **6. Kalafatova L.P.** Proektirovanie racional'noj shemy shlifovaniya na osnove rezul'tatov komp'yuternogo modelirovaniya naprjzhenno-deformirovannogo sostojaniya materiala v zone rezaniya / L.P. Kalafatova // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. - Har'kov: NTU «HPІ», 2000. – № 57. - S. 96-99. **7. Kalafatova L. P.** Issledovanie tochnosti formoobrazovaniya izdelij iz sitallov pri shlifovanii / L.P. Kalafatova, D.V. Pokolenko, L.N. Fenik // Naukovi praci DonNTU. – Donec'k: DonNTU, 2007. – № 4 (124). – S. 96–108. **8. Gusev V.V.** Obosnovanie raschetnoj shemy dlja issledovaniya dinamicheskogo sostojaniya tehnologicheskoy sistemy almazno-abrazivnoy obrabotki tonkostennyh obolochek iz sitala / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, S.Ju. Olejnik // Suchasni tehnologії v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – Har'kov: NTU «HPІ», 2011. – Vip. 6. – S. 14-23. **9. Gusev V.V.** Issledovanie dinamicheskogo sostojaniya tehnologicheskoy sistemy almazno-abrazivnoy obrabotki tonkostennyh obolochek iz sitallov / V.V. Gusev, L.P.Kalafatova, S.Ju. Olejnik // Visnik SevNTU. Serija: Mashinopriladobuduvannja ta transport: zb. nauk. pr. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – Vip. 128. – S. 60-67. **10. Gusev V.V.**

Teoreticheskoe issledovanie vlijanija rezhimov obrabotki na uroven' vibracij pri almaznom shlifovanii tonkostennyh obolochek iz hrupkih nemetallicheskih materialov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, S.Ju. Olejnik // Visnik SevNTU. Serija: Mashinopriladobuduvannja ta transport. - Sevastopol': SevNTU, 2013. – Vip. № 139/2013. – S. 57-62. **11.** Gusev V.V. Issledovanie vlijanija konstrukcii opravki na vibracii v zone kontakta almaznogo kruga i izdelija pri shlifovanii krupnogabaritnyh tonkostennyh obolochek vrashhenija iz hrupkih nemetallicheskih materialov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova, S.Ju. Olejnik // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem: zb. nauk. prac'. - Kramators'k: DDMA, 2013. – Vip. 32. – S. 122-133. **12.** Kalafatova L.P. Matematicheskaja model' dlja opredelenija zakonomernostej formirovanija pogreshnosti obrabotki pri shlifovanii obolochek slozhnogo profilja iz sitalla / L.P. Kalafatova, S.Ju. Olejnik, D.V. Pokolenko // Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi. – Herson, 2016. – №2 (13). – S. 89-99. **13.** Oljnik S. Analitichna model' mehanizmu utvorennja sumarnoї pohibki profilju virobiv tipu obolonok z krihkih nemetalevih materialiv pid chas almaznogo shlifuvannja / S.Ju. Oljnik, L.P. Kalafatova, D.V. Pokolenko // Tehnichni nauki ta tehnologii: naukovij zhurnal. – Chernigiv: ChNTU, 2017. - № 1(7). – S. 33-41.